

2권선 자기 여자 유도 발전기의 특성 해석

김철진\*, 이관용\*, 이운진\*, 백수현\*\*, 한경희\*\*  
 한라 대학교\*, 동국 대학교\*\*

Performance analysis of 2-phase self-excited Induction Generator

Cherl-jin Kim\*, Kwan-young Lee\*, Yun-jin Lee\*, Soo-Hyun Baek\*\*, Kung-Hee Han\*\*  
 Halla Univ\*, Dongguk Univ\*\*

**Abstract** - With increased emphasis on non-conventional energy system and autonomous power generation, development of improved and appropriate generating system has assumed signification.

This paper describes the performance analysis of 2-phase self-excited induction generators. The minimum capacitance of self-excited capacitor connected auxiliary winding is determined the suitable value using circuit equations of auxiliary winding. For the steady state analysis, the equivalent circuit of 2-phase induction generators is used as circuit modeling using the double-revolving field theory. The validity of designed generator system will be confirmed by experimental and computed results.

1. 서 론

최근 자원 고갈에 대응하기 위한 풍력 발전 시스템 등 대체 에너지 시스템과 자력 발전이 가능한 개별 독립형 발전 시스템의 성능 향상과 개발이 요구되고 있다. 일반적인 교류 발전의 대안으로서 3상 자기 여자 유도 발전기(SEIG)의 명확한 장점에 관해서는 다수의 연구가 진행되고 있다. 이러한 장치는 10 ~ 100kW의 출력 범위에 적합하나, 소형 휴대 장치의 경우는 0.1 ~ 10kW 정격 출력을 갖는 단상 유도 발전기가 적합하다 할 수 있다. 본 연구에서는 소형이며 경제적이고 브러시를 갖지 않으며, 유지 보수가 용이한 소형 단상 자기 여자 유도 발전기를 대상으로 적합한 등가 모델을 설정하고 이를 근거로 특성 분석 및 설계를 실시하였다.

본 연구에서 제시한 시스템은 자기 여자를 위한 병렬 커패시터와 저항성 부하를 전기적으로 90°의 위상차를 갖는 보조권선과 주권선 양 단자에 각각 연결하였다. 시스템의 정상상태 해석은 2중 회전 자계를 이론을 기본으로 한 등가회로부터 특성분석을 수행하였으며, 보조권선의 등가회로 해석 및 실험을 통하여 자기여자에 적합한 최소 정전용량을 결정하였다. 컴퓨터 시뮬레이션과 제작된 발전 시스템의 실험을 통한 해석 및 분석으로부터 해석의 타당성을 입증하였다.

2. 2권선 자기 여자 유도 발전기의 특성

2.1 기본구조

본 연구에서 적용한 소형 단상 자기 여자 유도 발전 시스템의 구조는 그림 1과 같다. 시스템은 원동기, 변속용 기어, 병렬 커패시터, 단상 유도 발전기 및 부하로 구성하였다. 원동기는 속도 가변이 가능한 제어를 갖는 유도 전동기이며, 제어 대상이 되는 유도 발전기의 축에 커플링을 통해 연결되어 회전한다. 소형 유도 발전기는 농형 회전자를 갖는 일반적인 2권선 유도 발전기를 적용

하였으며, 전기적으로 90°도의 위상차를 갖는 2권선을 사용하였다. 2권선은 주권선 및 보조 권선으로 각각 자기 여자 커패시터와 저항성 부하를 연결하였다. 소형 단상 유도 발전기의 전압 유기에 기인하는 여자(excitation) 성분은 회전자의 잔류 자기에 의한 자계와 보조 권선에 연결된 병렬 커패시터  $C_p$ 에 의한 전계의 지속적인 에너지 순환에 의한 자기여자(self excitation)이다. 아래의 그림 1.은 본 연구에 적용한 소형 단상 유도 발전기의 시스템의 기본 구조를 나타낸 그림이다.

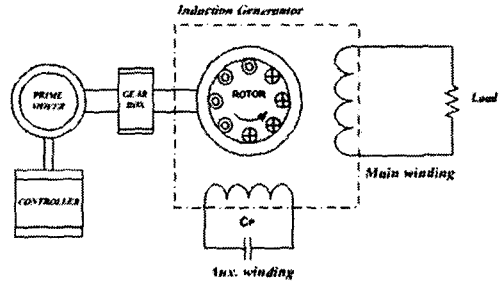


그림 1. 자기 여자 유도 발전기 기본 구조

2.2 시스템 모델링

시스템과 해석을 위한 단상 유도기의 등가회로는 2중 회전 자계이론을 기본으로 모델링하였다 [1,2,3]. 2권선 자기 여자 유도 발전기의 정상상태 등가회로는 그림 2.에 나타내었다. 그림 2에서 역방향 자계를 기준으로 한 자화 리액턴스는 고정자 측에서 본 회전자 저항과 비교해 그 값이 매우 크기 때문에 무시 할 수 있다. 또한, 자기 여자를 위해 공급되는 보조권선의 무효전력 성분은 주권선과 보조권선의 임피던스 차에 의한 값으로 나타낼 수 있다.

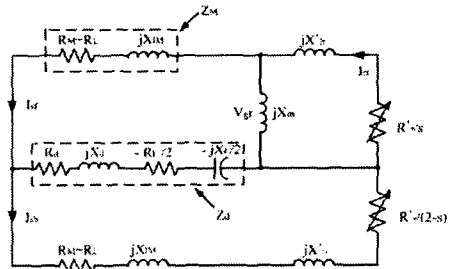


그림 2. 이중 회전 자계에 의한 등가회로

정격 주파수에서 측정된 파라미터들을 상수로 취하고, 정규화 시킴으로써 2권선 단상 SEIG는 각각의 속도에서 특성 분석을 할 수 있다. 따라서 정규화된 등가회로는 아래의 그림 3.과 같이 나타낼 수 있다.

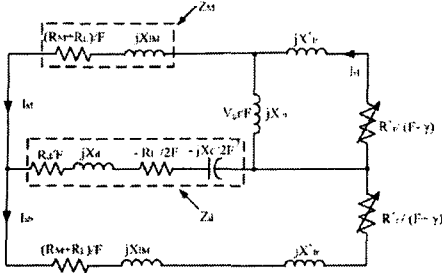


그림 3. 정규화 등가회로

▶ 기호

- $R, X$  : 저항, 리액턴스
- $V, I$  : 전압, 전류
- $f_R$  : 파라미터 정격 주파수(발전 주파수)
- $f$  : 실제 회전자 주파수(여자 주파수)
- $F$  : 정규화 주파수( $f_R/f$ )
- $\omega$  : 실제속도에 대한 동기 속도
- $\omega_R$  : 정격 주파수에 대한 동기 속도
- $\gamma$  : 정규화 회전자 속도
- $s$  : 슬립 ( $s = \frac{\omega_R - \omega}{\omega_R} = \frac{F - \gamma}{F}(P, U)$ )
- $P$  : 전력
- $\eta$  : 전 효율(overall efficiency)

▶ 아래첨자

- $s, r, g$  : 고정자, 회전자, 공극
- $f, b$  : 순방향, 역방향
- $M, A$  : 주권선, 보조권선
- $L, I, m, C$  : 누설, 부하, 자화, 정전용량

그림 3.으로부터 2권선 단상 유도 발전기 시스템을 위한 특성 방정식은 아래와 같다.

$$R_d = [R'_d - R_m] / 2 \quad (1)$$

$$X_d = [X'_{d1} - X_{m1}] / 2 \quad (2)$$

$$(R'_d = \frac{R_d}{a^2}, X'_{d1} = \frac{X_{d1}}{a^2})$$

$$\bar{Z}_d = R_d + jX_d - \frac{R_l}{2F} - \frac{jX_c}{2F^2} \quad (3)$$

$$\bar{Z}_m = \frac{R_m + R_l}{F} + jX_m \quad (4)$$

$$\bar{I}_g = \frac{\frac{V_g}{F} (\bar{Z}_m + \bar{Z}_d + \frac{R_r}{F + \gamma} + jX_b)}{D} \quad (5)$$

$$(\bar{D} = [(\bar{Z}_m + \bar{Z}_d) (\bar{Z}_m + \bar{Z}_d + \frac{R_r}{F + \gamma} + jX_b)] - \bar{Z}_d^2)$$

$$\bar{I}_b = V_g \bar{Z}_d / \bar{D} F \quad (6)$$

$$\bar{I}_r = \frac{-V_g / F}{(\frac{R_r}{F - \gamma} + jX_b)} \quad (7)$$

$$\bar{I}_M = \bar{I}_g + \bar{I}_b \quad (8)$$

$$\bar{I}_A = j(\bar{I}_g - \bar{I}_b) \quad (9)$$

$$P_g = |I_g|^2 R_L, P_b = |I_b|^2 R_L \quad (10)$$

$$T = \frac{P_g - P_b}{\omega_R} \quad (11)$$

$$P_{out} = |I_M|^2 R_L \quad (12)$$

$$P_{in} = 2|I_g|^2 \frac{R_r \gamma}{F - \gamma} + 2|I_b|^2 \frac{R_r \gamma}{F + \gamma} \quad (13)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in} + P_c + P_{FW}} \quad (14)$$

( $P_c$ : 코어 손실,  $P_{FW}$ : 풍손 및 마찰손실)

소형 단상 유도 발전기의 파라미터는 실험 및 자기 해석 프로그램을 이용하여 산출하였다. 저항과 누설 리액턴스는 DC저항 측정과 회전자 구속 시험으로 측정 하였다. 자화 리액턴스( $X_m$ )는 공극자속과  $V_g$ 에 의해 변하며,  $V_g$ 는 속도에 따라 변화한다. 따라서 동기 속도 시험과  $V_g$ 와  $I_m$ 의 자화특성으로부터 측정 할 수 있고, 측정된 자화 특성으로 속도에 따른  $V_g$ 를 식 (5) - (7)의 특성 방정식 대입하여 의 주권선 및 보조권선 전류를 산출한다. 또한, 식(11) - (14)의 토크, 입·출력 전력 및 효율을 구할 수 있다.

2.3 자기 여자(Self-excitation)

자기 여자는 회전자의 잔류 자속에 의해 초기에 여자되며 커패시터를 사용하여 자기 여자가 이루어진다. 자기 여자용 고정자 권선의 역방향 자계로 인해 발생하는 유기 전류는 단방향 자계를 발생하며 결과적으로 발전기의 동작을 나타낸다. 기기가 외부 원동기에 의해 구동될 때, 회전하는 회전자의 잔류 자속으로 고정자 권선에는 미소 전압이 유기된다. 보조 권선 양단에 적절한 커패시터를 연결하면 진상 전류가 흐른다. 이것은 코어 자속을 증가시키고, 유도 전압과 커패시터 사이의 전압 차가 동일하게 되도록 하는 원인이 된다. 전압의 지속적인 상승은 기기의 자기 포화에 의해 억제되고, 정상상태에 도달하게 된다. 안정된 전압은 속도, 정전용량, 기기 파라미터, 자화 특성과 부하에 의존하며 이러한 자기 여자 현상은 전계(커패시터)와 자계(기기)사이의 지속적인 에너지 순환에 기인한다. 또한, 자기 여자를 위한 최소 정전용량은 보조 권선의 등가회로로부터 정의 할 수 있다. 보조 권선의 전류가 회전자에 무효 전력을 공급하기 위해서는 주권선 전류보다 위상이 앞서야 하므로  $\bar{I}_A \geq \bar{I}_M$ 의 조건을 만족해야 하며, 다음의 식이 성립한다.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \leq 0 \quad (15)$$

$$\omega L \leq \frac{1}{\omega C} \quad (16)$$

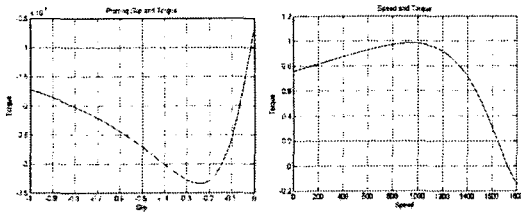
2.4 특성 해석

단상 유도 발전기의 특성해석을 위해 DC 저항 측정, 회전자 구속 시험, 동기속도 시험 및 자기해석 프로그램을 이용하여 파라미터를 산출하였다. 산출된 파라미터로부터 Matlab을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 아래의 표1은 본 연구에 적용된 단상유도 발전기의 파라미터를 나타내고 있다.

Parameters	Value
$R_M$ [ $\Omega$ ]	44.9
$R_A$ [ $\Omega$ ]	66.74
$R_r$ [ $\Omega$ ]	97.3
$X_{IM}$ [ $\Omega$ ]	21.76
$X_{IA}$ [ $\Omega$ ]	29.62
$X_{Ir}$ [ $\Omega$ ]	26.95
$X_M$ [ $\Omega$ ]	355.03
$C_p$ [ $\mu F$ ]	7
$f_n$ [Hz]	60
Turn ratio	1.067
$P_n$ [W]	90

표1. 단상 유도 발전기 파라미터

표1의 파라미터를 적용한 Matlab시뮬레이션 결과는 단상유도 발전기의 슬립-토크 곡선의 그림 4와 같다. 그림 4의 (a)는 단상 유도기의 발전 동작영역을 나타내고, (b)는 단상유도기의 토크 발생 영역을 나타낸다.



(a) 발전 동작 영역 (b) 토크 발생 영역

그림 4. 단상유도기의 슬립-토크 곡선

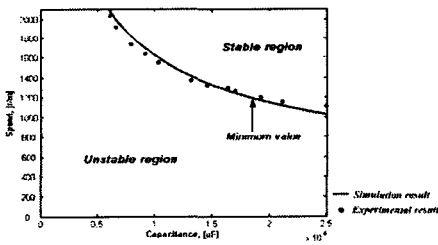
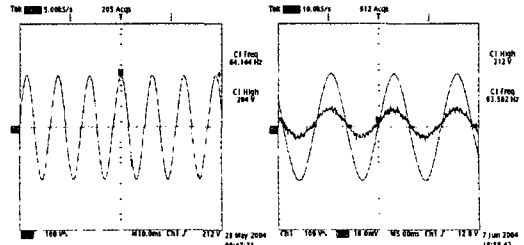


그림 5. 정전용량( $\mu F$ ) - 속도(r/m)

그림 5는 보조권선의 파라미터에 따른 자기여자를 위한 정전용량 - 속도 곡선으로 Matlab시뮬레이션 한 결과와 실험 결과를 비교하여 나타낸다. 외부의 원동기 속도에 따른 자기여자용 정전용량 설계시 안정한 자기여자를 위한 임계 정전용량을 확인할 수 있다.

### 2.5 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 2권선 단상 SEIG의 특성을 평가하기 위하여 90[W], 4극,  $V_n=220$ ,  $f_n=60$ [Hz],  $C_p=7$ [ $\mu F$ ]의 사양을 갖는 단상유도기로 실험을 수행하였다. 발전 시스템은 원동기(prime mover), 기어(1:3), 커플링을 사용하여 구성하였다. 또한 제어기를 통해 원동기를 제어함으로써, 다양한 속도에서 SEIG를 해석하고, 보다 더 폭 넓은 속도를 위해 기어를 연결하였다. 그림6은 원동기로부터 구동되는 SEIG 보조 권선 양단에 병렬 커패시터( $C_p=7 \mu F$ )를 연결하고 주 권선 양단을 측정된 결과이다. 그림 6.(a)는 무부하 출력전압을 나타내고, 그림 6.(b)는 램프(220V/30W)를 주 권선에 연결하여 측정된 출력전압과 출력전류 파형을 나타낸다.



(a) 무부하 출력전압 (b) 부하 출력전압 및 전류  
(100V/div) (100V/div, 0.5A/div)  
그림 6. 주권선 양단의 출력 전압 및 전류

그림 7은 본 연구에서 실험을 위해 설계 및 제작된 단상 자기여자 발전 시스템의 구성과 부하로 적용한 램프 구동 시의 SEIG발전 시스템의 실제 구성을 나타낸다.

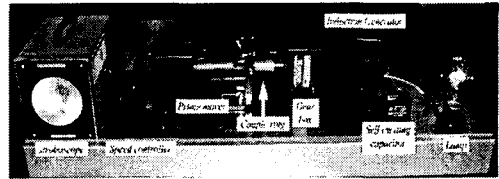


그림7. 단상 자기여자 발전 시스템

### 3. 결 론

본 연구에서는 2상 고전자 권선을 갖는 표준 농형 회전자로 설계된 90[W]급 유도 발전기의 보조 권선 양단에 병렬 커패시터( $C_p$ )와 주권선 양단에 부하를 각각 연결한 자기여자 발전 시스템의 특성 분석 및 실험을 수행하였으며, 속도 변화에 대한 보조 권선 자기여자 커패시터의 설계 조건을 도출하였다. 제안된 설계 방안은 보조

권선의 등가회로로부터  $\omega L < \frac{1}{\omega C}$ 의 조건이며, 안정한 자기여자 영역과 불안정한 자기여자 영역으로 나타내었다. 불안정 영역에서는 회전자의 잔류 자속에 의한 자계를 소자하는 방향으로 기전력이 발생되어 감자되는 현상을 시뮬레이션 및 실험 결과로부터 확인하였다. 또한, 주권선 양단에 부하로 램프를 연결하여 가시적으로 출력 전압과 전류가 안정하게 동작하는 것을 확인하였다.

이 시스템은 소형이며, 신뢰성이 우수하고, 유지보수가 수월한 독립형 발전기에 적합한 특징을 갖는다. 향후, 성능 예측과 설계 향상을 목적으로 전압과 주파수를 제어 할 수 있는 인버터 및 축전지 시스템을 적용하여 산업적 응용에 관한 적합성을 확인 할 예정이다.

### [참고 문헌]

- [1] AE Fitzgerald and C Kingsley "Electric Machinery" McGraw Hill Book Co. Second Edition, 1961, pp. 528-538.
- [2] NN Hancock "Matrix Analysis of Electric Machinery Pergamon, 1964 pp 103- 163 and 220.
- [3] CG Veinott "Theory and Design of Small induction Motors", Mc Graw Hill Book Co., 1959, pp 184-196, pp 354-364
- [4] CG Veinott and JE Martin, "Fractional and subfractional Horse Power Electric Motors", Mc Graw Hill Book Co, Fourth Edition Fig.10 Photograph of the Developed SEIG
- [5] DB Watson, J Ariliaga and T Densam "Controllable d.c. power supply horn wind driven self-excited induction machines" Proc.IEE. V01.126, No. 12, Dec.1979. pp 1245-1 248